

## СЕКЦИЯ 6. РАЗРАБОТКА НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 620.173.2

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОССТАНОВЛЕННОЙ ТВЕРДОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ МИКРОИНДЕНТИРОВАНИЮ

А. В. Халецкий<sup>1</sup>, Р. Е. Гутман<sup>1</sup>, В. М. Ткачев<sup>2</sup>, И. Н. Степанкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»  
БелНИПИнефть», г. Гомель

<sup>2</sup>Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Микро- и макроиндентирование материалов непрерывным вдавливанием жесткого инструмента – пирамид Виккерса, Берковича и др. является сравнительно недавно открытым способом оценки различных свойств материалов, впервые опубликованный в работе [1]. Одним из вариантов регистрации результатов исследования является построение диаграмм в осях нагрузка–перемещение. На получаемых графиках укрупненно регистрируется ветвь нагружения и разгрузки. В зависимости от свойств испытуемого материала на кривой могут дополнительно присутствовать участки, отражающие процесс релаксации упругопластических деформаций, свойственный металлам, а также упругого восстановления формы отпечатка [2]. Собственно упругая реакция материала является одним из наиболее привлекательных проявлений взаимодействия материала с индентором. Она регистрируется по ветви разгрузки. По результатам анализа этой части кривой индентирования можно определить одну из важнейших упругих констант материала – статический модуль Юнга. Его расчет осуществляется на основании частного решения задачи Герца об упругом вдавливании жесткого тела в полупространство [3]. При использовании в качестве индентора пирамиды Виккерса определение модуля Юнга осуществляется по зависимости (1):

$$E = (1 - \nu^2) \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Ap} \left( \frac{dw}{dP} - \frac{dh_n}{dP} \right) - \frac{1 - \nu_u^2}{E_u} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $\sqrt{Ap}$  – площадь проекции упругого контакта, зависящая от контактной глубины  $h_c$ , формирующейся при внедрении и пластической деформации испытуемого материала;  $dh_n$  – суммарная поправка на податливость, состоящая из податливости измерительного прибора;  $E$  и  $E_u$  – модули упругости, Па;  $\nu$ ,  $\nu_u$  – коэффициенты Пуассона двух контактирующих материалов;  $P$  – нагрузка, Н;  $w$  – перемещение индентора, м.

В случае практического применения указанной формулы одной из основных проблем, связанных с достижением необходимой точности расчета, является задача определения площади проекции упругого контакта –  $Ap$ . Ее принято рассчитывать исходя из глубины  $h_c$ . При определении данного параметра важной методологической особенностью является учет двух видов упругой деформации. Она при разгрузке индентора регистрируется второй частью графика (рис. 1).

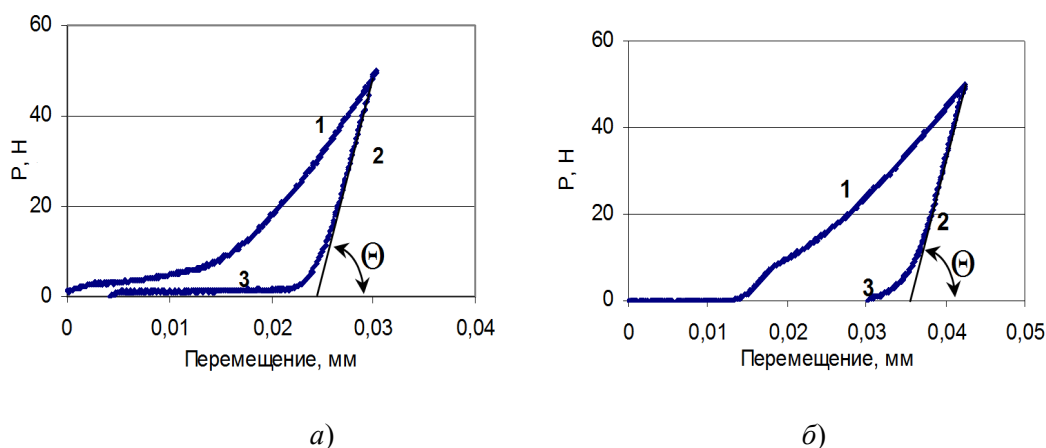


Рис. 1. Кривые индентирования термообработанной стали Р6М5 (а) и природного пористого материала (б)

Однако форма кривой разгрузки существенно отличается при испытании материалов различной природы. Как видно из рис. 1, упругая отдача при разгрузке инструментальной стали Р6М5 (63HRC) регистрируется на двух участках. На начальном этапе разгрузки – участок кривой 2 (рис. 1, а) – наблюдается практически прямолинейная зависимость, располагающаяся под некоторым углом  $\Theta$ , отражающим модуль Юнга материала. На конечном участке 3 происходит упругое восстановление формы отпечатка. При испытании природного материала – горной породы, содержащей в своей основе соединения кальция отмечено только упругое оттеснение индентора основным объемом материала – участок 2 (рис. 1, б), а восстановление формы отпечатка (участок 3), регистрируется значительно более коротким графиком. Данный материал в отличие от большинства металлических сплавов обладает определенной пористостью. Кроме того, его разрушение как правило происходит исключительно по хрупкому механизму [4]. Поэтому в момент нагружения (кривая 1) происходит нарушение пористой структуры и образование плотного слоя, который в последующем не восстанавливает свою структуру при разрушении. Эту особенность необходимо учитывать при расчете координаты углубления индентора, которая используется для определения площади проекции упругого контакта –  $A_p$ . В нашем случае проведенные экспериментальные исследования показали, что при исследовании металлических материалов глубина внедрения индентора, используемая в расчетах, соответствует точке на границе между участками кривой 2 и 3. Расчет модуля Юнга, проведенный для стали Р6М5, показал, что рассчитанная величина отличалась от табличного значения, полученного по стандартной методике не более чем на 10 %. Аналогичные результаты достигнуты при испытании природного материала, но с учетом того, что расчет площади проекции контактной поверхности производился для максимальной глубины. Подобные различия объясняются природой взаимодействия индентора с испытуемыми материалами. Поверхностный слой металлических сплавов по мере разгрузки и упругого отторжения не изменяет своего физического состояния и не подвергается разрушению, т. е. размер отпечатка, сформированный в условиях упругопластической деформации поверхностного слоя и упругого искажения отпечатка при максимальной глубине внедрения индентора и его положении в точке сопряжения участков графика 2 и 3, одинаков. В то же время размер отпечатка природного материала вследствие своей хрупкости изменяется. Материал по мере

подъема индентора разрушается (рис. 2). В итоге достоверная проекция площади упругого контакта может быть определена при расчете по максимальной глубине внедрения индентора.

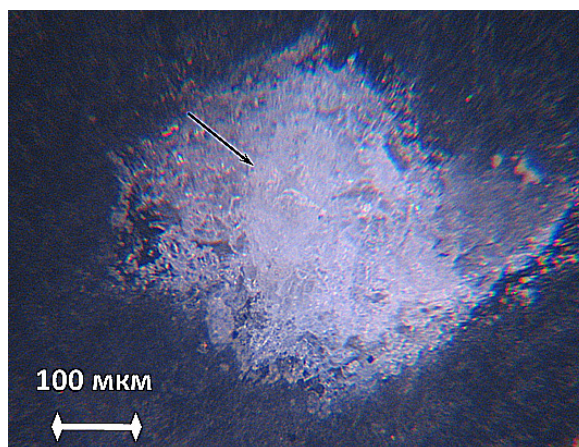


Рис. 2. Форма отпечатка индентора, полученная при испытании природного материала

#### Литература

1. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. P. Pharr. // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7, № 6. – P. 1564–1575.
2. Golovin, Yu. I. Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolumes, thin near-surface layers, and films A Review / Yu. I. Golovin // Physics of the Solid State. – 2008. – Vol. 50, № 12. – P. 2205–2236.
3. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // Journal für die reine und angewandte Mathematik. – 1881. – Vol. 92. – P. 156–171.
4. Le, H.-T. Assessing the mechanical properties of a rock using indentation tests / H.-T. Le, F. Descamp, J.-P. Tshibangu, J.-F. Nauroy, O. Vincke and L. Cangemi // Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment – Kwasniewski & Łydzba (eds). Taylor & Francis Group. – London, 2013. – P. 146–150.